

極厚H型鋼柱、はり溶接接合部分の脆性破壊に
関する研究 (COD試験)

中山 昭夫 ・ 栗田 裕次

Study on the Brittle Fracture of Welded Beam-to-Column
Connections of Heavy Steel
(COD Testing)

Akio NAKAYAMA and Hirotsugu KUWADA

ABSTRACT

It was reported that the brittle fracture in plastic range at room temperature took place in the full scale tests of wide flange beam-to-column connections of which the thickness of column flanges were from 40 mm to 60 mm.⁽¹⁾⁽²⁾ It is very important to analyze this phenomenon, because the wide flange of heavy steel section is generally used in the construction of multi-story buildings.

In general, the following factors seem to have influence upon brittle fracture;

- (1) material properties (grade of steel, change of material properties by welding, anisotropy of rolled steel, etc.)
- (2) temperature (transition temperature)
- (3) constraint intensity of plastic deformation (plane strain, dimensions of members, etc.)
- (4) residual stresses (by rolling and welding, etc.)

The brittle fracture is caused by superposition of these factors, and it is necessary to make clear how these factors affect on the brittle fracture. The former two factors can be estimated by the test of small specimen, but the latter two cannot be done by it, and they should be estimated by the test of large scale specimen. Therefore the authors examine the fracture toughness of welded beam-to-column connections of heavy steel section.

At first stage we focused our attention on the former two factors, that is, (1) material properties and (2) temperature, and carried out the COD testing of small scale specimen which is little affected by the latter two factors.

1. はじめに

構造物の安全をはかる上で、その構造系全体としての靱性 (ductility) を確保することが重要である。一般に鋼材はねばり強い性質をもっているために、その破壊に至るまでに消費されるエネルギーは大きくなる。しかしながら、この靱性に富む鋼材も破壊様式によっては十分な靱性を示さない場合もある。

このような鋼材の破壊様式の例に疲労破壊、脆性破壊、応力腐蝕割れ等が挙げられる。

これらは近年急速に発展してきた破壊力学により、その挙動が明きらかにされつつあるが、まだ未解決の問題を多く含んでいる。

脆性破壊は他の破壊様式と比較して Crack の進展が非常に速く、鋼中の音の伝播速度の約 $\frac{1}{2}$ 程度の速さで伝播していき、瞬時にして構造物を破壊してしまうことはよく知られるところである。

このような破壊の場合、その破壊の途中で構造物を補強して構造物の安全をはかるということは不可能であり、脆性破壊防止のためには十分な設計及び施工上の配慮が必要である。

鋼材の脆性破壊が問題になってくるのは溶接法の発展と密接な関連があり、20世紀半ば頃より大型鋼構造物に溶接が多用されるようになってからである。

その後1938年のHasselt溶接橋の破壊事故以来、多数の溶接構造物が冬季の低温のもとで脆性破壊事故を引き起こした。

特に第2次世界大戦中における米国の溶接船の脆性破壊事故は有名である。この大戦中、米国の軍事輸送力増強のため建造されたLiberty型全溶接船4794隻のうち約 $\frac{1}{4}$ にあたる1289隻に脆性破壊事故例が報告されている。

このような脆性破壊は鋼材が低温の状態では切欠きに対して脆くなる性質、いわゆる切欠き靱性 (notch toughness) の不足に起因することはよく知られた事実である。

建築の分野における脆性破壊事故はほとんど例がなく従来脆性破壊の重要性はあまり論議されていない。

その理由として考えられることは

(1) 建築は人間が生活する空間をつくるため、使用鋼材の温度は常温域の場合が多い。

(2) 建築構造物は土木、船舶等に比較して規模が小さく部材は薄肉小型断面が多い。

といった理由が主なものであろう。

すなわち常温域においては鋼材は十分な延性を示し、また薄肉小型断面材は変形能力が大きく、このような条件

下では脆性破壊の危険性は比較的少ない。

しかしながら、超高層建築に見られるように鋼構造物の大型化に伴って、極厚大型断面の部材が使用される傾向が進むと建築鋼構造物も脆性破壊に対して安全であるとは言えなくなる。

すなわち、極厚大型断面材はその板要素の剛性が大きい

ため塑性変形しにくく、変形能力に問題がある。このため鋼材の変形により消費できないエネルギーが構造体内部にひずみエネルギーとして蓄積され、このひずみエネルギーが限界値に達すると破壊が生じることになる。このようなひずみエネルギーの重要性を指摘した研究に加藤博士等の極厚H型鋼の実験報告がある。⁽¹⁾⁽²⁾

この研究は一連の引張接合部の耐力試験の研究の一部であるが、フランジ厚40mm~60mmの極厚H型鋼柱、はり接合部の実験を常温域で行なったところ、柱の全塑性モーメントを超えたあたりで引張材溶接部近旁から脆性破壊が生じたことが示されている。

この様なフランジ厚40mmを超える極厚H型鋼は超高層建築には一般に用いられており、また全溶接の超高層建築も建設されている現状を考えるとこの現象の早急の解明が必要とされる。

本研究はこのような極厚H型鋼柱、はり接合部の脆性破壊発生を明きらかにすることを目的として計画されたものである。

本報告ではその第一段階として、寸法効果及び残留応力の影響が比較的少ない小型COD試験体により、材質及び温度の影響を調べる目的で柱、はり溶接接合部を想定したモデルの実験結果について報告する。

2. 実験概要

(1) 試験体

前に述べたとうり実験対象は、極厚H型鋼柱、はり溶接部分を想定した小型COD曲げ試験による破壊靱性試験である。

COD試験体は柱、はりフランジプレート部分がモデルでありA、BおよびCの3タイプを考えた。

まずAタイプ試験体はロール方向の違いによる鋼材の異方性を検討するための板厚方向に関する柱、はり溶接部モデルであり、柱フランジプレートへ、はりフランジプレートを溶接した場合である。(Fig. 1~2 参照)

次にBタイプはロール方向鋼材が解析対象の試験体であり、モデルはロール方向同士のフランジプレートが溶接された部分とする。(Fig. 3 参照)

最後にCタイプはロール方向のフランジプレート母材を検討する。

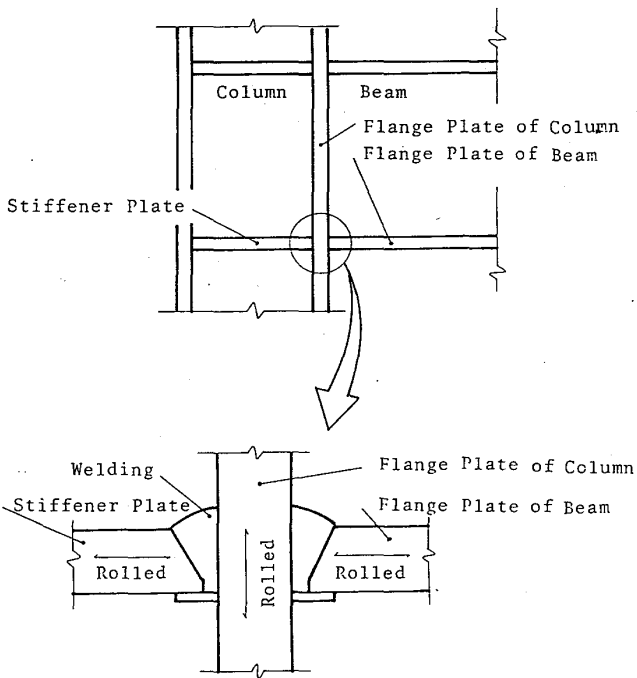


Fig. 1 Test specimens of welded beam-to-column connections (A-Type specimens)

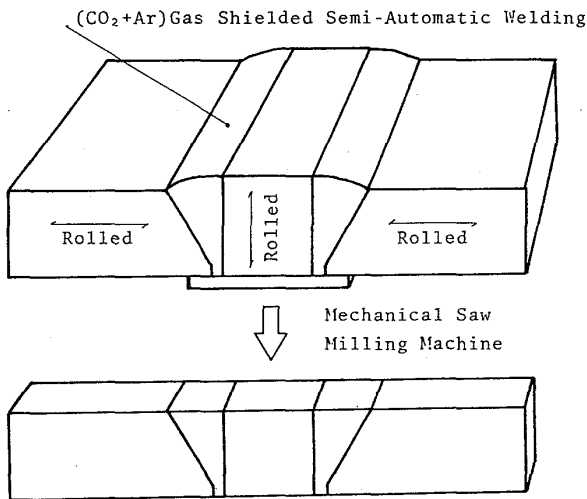


Fig. 2 Manufacturing process of A-Type specimens

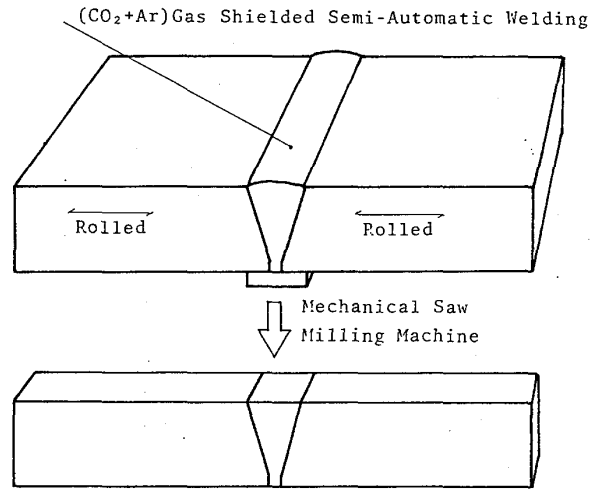


Fig. 3 Manufacturing process of B-Type specimens

3モデルのうち材質の評価対象はそれぞれ異り、下記のようにノッチ先端の材質から、5種類の試験片に分類した。

- ① AB試験体 (板厚方向母材)
- ② AH試験体 (板厚方向H.A.Z.)
- ③ BD試験体 (ロール方向 Depo)
- ④ BH試験体 (ロール方向 H.A.Z.)
- ⑤ C試験体 (ロール方向母材)

これらの試験体概要をFig. 4に示す。

使用鋼材は38mm厚鋼板、材種はSS41およびSM50YBであり、これらの機械的性質をTable 1に示す。またノッチ加工は機械鋸で行ない、ノッチ先端の幅は0.2mmである。

Table 1 Mechanical Properties

Specimen	Yield Stress (Kg/mm ²)	Ultimate Strength (Kg/mm ²)	Elongation (%)
SS41 (Rolled)	28.8	48.6	-
SM50YB (Rolled)	39.8	57.7	26.1

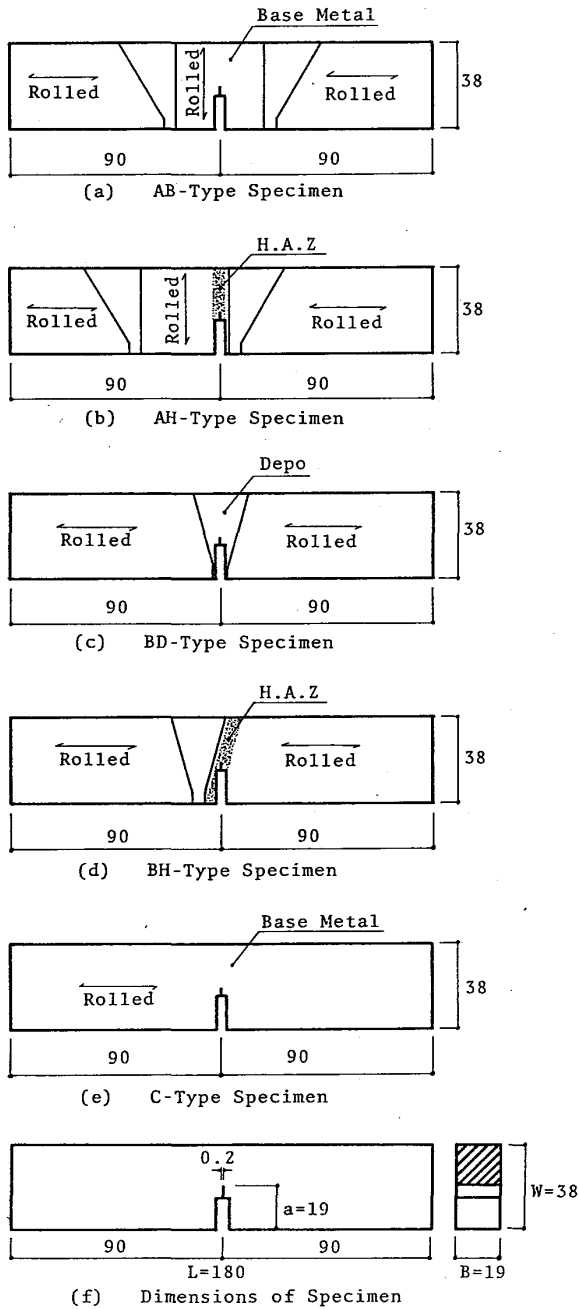


Fig. 4 COD Test Specimens for Bending (Unit:mm)

(2) 試験方法

日本の建築物が受ける温度域を考えた場合、低温でせいぜい -50°C 前後と思われるため、試験温度に -50°C 、 -20°C 、 0°C および 20°C の4段階を定めた。試験体温度は 20°C を湯で、 0°C を氷で、 -20°C および -50°C を(エチルアルコール+ドライアイス)でそれぞれ与えた。

なお試験時間は約1分位のため、その間の温度変化は無視した。

COD曲げ試験はB.S.のDD19^③に従い、3点静的曲げを行なった。(Fig.5参照)

载荷には島津製作所製サーボパルサー(EHF-U10)を使用し、ピストンストローク変位 $0.2\text{mm}/\text{sec}$ で制御した。

またクラック開口変位はクリップゲージによりナイフエッジ面での開口変位を測定した。

曲げ荷重、および開口変位はX-Yレコーダに記録し、クリップゲージは数回の試験ごとに較正を行なった。

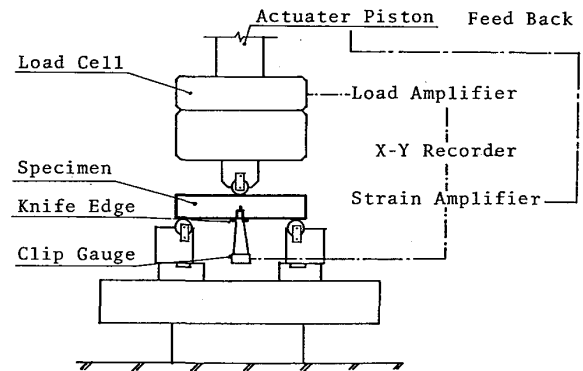


Fig. 5 Loading Configuration

3 実験結果

(1) 硬度分布

曲げ試験に先立って、COD試験体の硬度分布を調べた。

測定にはRockwell Bスケールを用い、常温域での硬度を計測した。

その結果をFig.6~7に示す。

これらの図を見れば、硬さ測定位置のなかで一番硬い材質はSS41でDepo, SM50YBでH.A.Zである。また一番軟い位置は両者とも母材である。

しかしSS41と比べ強度の大きいSM50YBの母材硬度は、SS41より硬い。

一般的に硬度と破壊靱性値の関係は密接と考えられるため、以上の溶接影響による材質の硬度分布は重要と思われる。

(2) COD値

COD値はX-Yレコーダに記録された荷重・変位曲線より算出した。

B.S.のDD19によれば、不安定破壊に先立って

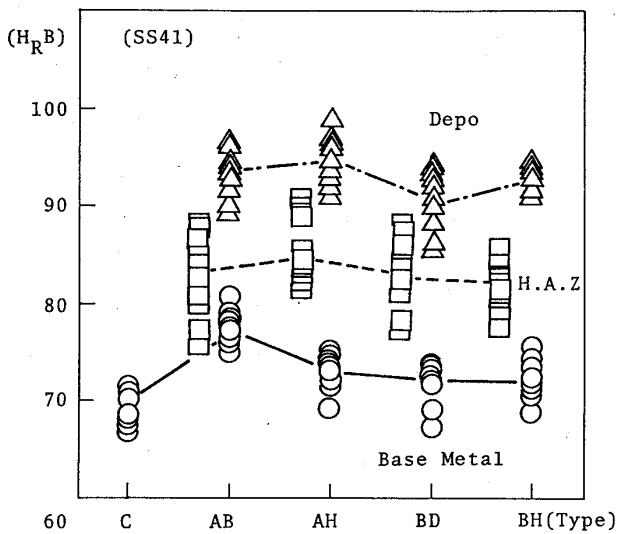


Fig. 6 Distribution of Rockwell B Hardness

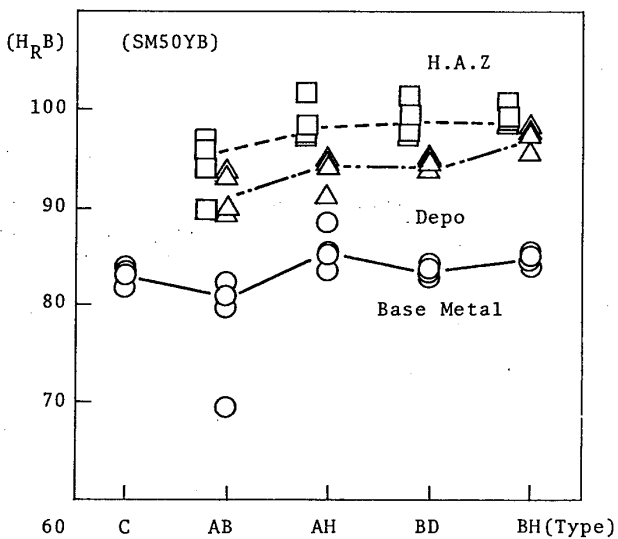


Fig. 7 Distribution of Rockwell B Hardness

ささかでも安定破壊が発生する場合、その発生時のCOD計測が重要であることを指摘している。この安定破壊の発生を検出する方法もDD19に記述されているが、実際に採用するのは困難なため、本実験で有効クリップゲージ変位の決定には原則として最大荷重時の開口変位を有効とし、最大荷重に至る前に明確な荷重減少が見られた場合につき、その点での開口変位を有効とした。

有効クリップゲージからクラック先端の有効COD値の算定には、Wellsによって導かれた次の式を使用した。

$$i) V_c \geq 2\gamma\sigma W(1-\nu^2)/E$$

$$\phi = \frac{0.45(W-a)}{0.45W+0.55a+Z} \left[\frac{V_c - \gamma\sigma W(1-\nu^2)}{E} \right]$$

$$ii) V_c < 2\gamma\sigma W(1-\nu^2)/E$$

$$\phi = \frac{0.45(W-a)}{0.45W+0.55a+Z} \left[\frac{V_c^2 E}{4\gamma\sigma W(1-\nu^2)} \right]$$

① 式

①式で算出したCOD値 $\Phi (= \delta_c)$ と試験温度の関係は、Fig. 8~9に示す。

Fig. 8~9によればロール方向母材のCOD値が一番大きく、板厚方向母材が一番小さい。母材以外のCOD値はこれらの間にある。

ロール方向母材の“Cタイプ試験体”は十分靱性があり、破壊に至るまで延性クラックが成長しているようである。

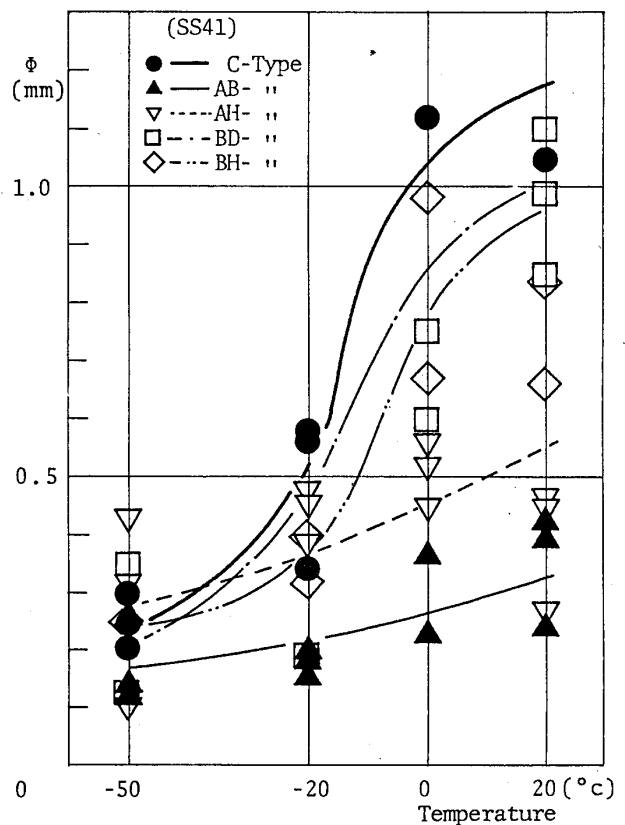


Fig. 8 COD Values V.S Temperature

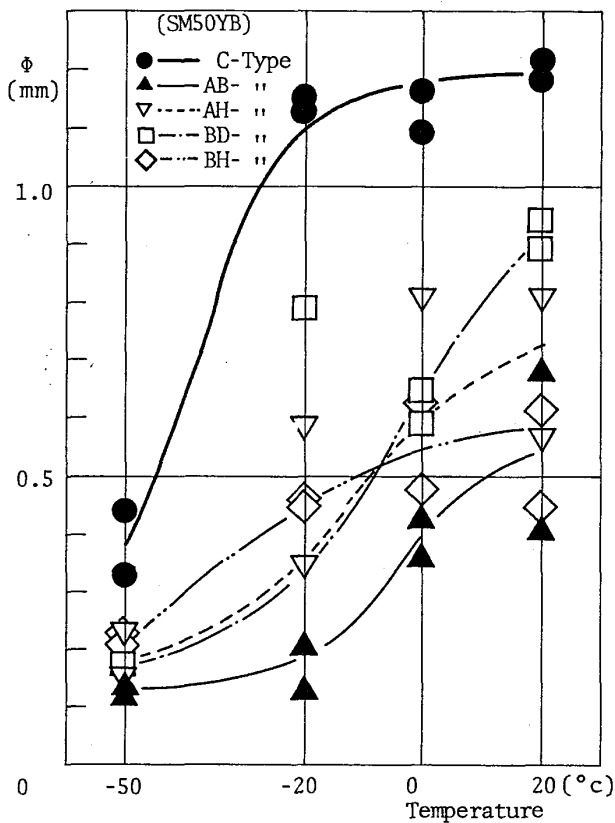


Fig. 9 COD Values V.S Temperature

これに対し板厚方向母材の“ABタイプ試験体”は脆く破壊し、板厚方向にはく離しているようである。この現象はLamellar Tearingと思われる。

しかし板厚方向H.A.Z.の“AHタイプ試験体”は、“ABタイプ試験体”より靱性値が大きい。

その他の試験体については、溶接で材質が脆化しているようである。

4. 結 論

極厚H型鋼柱、はりの溶接部分における脆性破壊に関して、鋼材の材質および温度の影響を把握する目的で、COD曲げ試験を行なったが、本実験の結果をまとめると次のようになる。

- (1) 鋼材種別の相違として、SS41とSM50YBの両者の母材でCOD値に大きな違いは認められないようである。

- (2) ロール方向母材は十分靱性があり、破壊に至るまで延性クラックが成長しているようである。

これに対し板厚方向母材は脆く破壊し、板厚方向にはく離しているようである。

この現象は、近年問題化しているLamellar Te-

aring^{(4)~(6)}と関連したものと思われる。

- (3) 溶接による熱影響は、ロール方向の材質を脆化させている。

しかし板厚方向に対しては逆であり、H.A.Z.の方が母材よりCOD値が大きい。

- (4) 今後の問題点としては、極厚部材における塑性変形の拘束効果と溶接時の残留応力が鋼材の脆性破壊に対してどの程度影響するか、分析する必要がある。この場合、硬さおよびLamellar Tearingの考慮も重要と思われる。

(謝 辞)

本研究にあたって、試験体の製作および、実験に御協力を頂きました日本鋼管株式会社福山研究所に感謝いたします。

《参 考 文 献》

- (1) 加藤 勉他、極厚鋼部材の脆性破壊、日本建築学会論文報告集、第156号 昭和44年2月 PP.1~10
- (2) 加藤 勉他、極厚鋼部材の脆性破壊(その2)、日本建築学会論文報告集、第176号 昭和45年10月 PP.11~16
- (3) British Standards, Method for Crack Opening Displacement (COD) Testing, DD19(1972)
- (4) 永尾敏男他、ラメラ・テアの発生におよぼす継手の拘束度の影響(第1報)、溶接学会誌、第45巻(1976)第2号 PP.31~39
- (5) 金沢正午他、ラメラ テアの発生要因について、溶接学会誌、第45巻(1976)第2号 PP.40~47
- (6) 金沢正午他、ラメラ テア感受性評価方法について、溶接学会誌、第45巻(1976)第3号 PP.72~78
- (7) 金沢 武他、破壊力学と材料強度講座8 脆性破壊2=破壊靱性試験、(株)培風館 昭和52年9月